

## Аэродинамика летательных аппаратов

УДК 533.682

Гуренков А.С., Климашин С.В., Фролов В.А.

### РАСЧЁТ ПОДЪЁМНОЙ СИЛЫ ПЛАСТИНЫ ВБЛИЗИ ЭКРАНА МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ

Экранный эффект возникает при полёте летательного аппарата на близком расстоянии от экрана (земли, воды). Помимо самолётов, которые испытывают влияние экрана на режимах взлёта и посадки, существует целый класс летательных аппаратов, основанных на данном эффекте, – экранопланы. Различные аспекты экранного эффекта исследовались в работах [1-4]. Предельным случаем обтекания тонкого аэродинамического профиля можно считать плоскую пластину. Результаты влияния экрана на подъёмную силу пластины представлены в данной работе.

Математическая модель основана на методе дискретных вихрей (МДВ) [1]. Согласно МДВ плоская пластина разбивается на  $n$ -ое количество отрезков, на каждом из которых на расстоянии  $\frac{1}{4}$  от передней кромки размещается вихрь, а на расстоянии  $\frac{3}{4}$  находится контрольная точка, в которой выполняется условие непротекания. Дальнейшие вычисления сводятся к нахождению неизвестных циркуляций дискретных вихрей посредством решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$[A][\Gamma] = [R], \quad (1)$$

в которой  $[A]$  – матрица аэродинамического влияния;  $[\Gamma]$  – вектор-столбец неизвестных циркуляций;  $[R]$  – вектор-столбец правых частей, определяемых невозмущённым потоком на бесконечности.

Коэффициент подъёмной силы на основании формулы Н.Е. Жуковского находится как

$$C_{ya \text{ расч}} = \frac{2\Gamma}{V_{\infty} b}, \quad (2)$$

где  $\Gamma$  – циркуляция;  $V_{\infty}$  – скорость набегающего потока;  $b$  – длина хорды.

Расчёт по МДВ для безграничного потока показал, что коэффициент подъёмной силы (2) не зависит от количества дискретных вихрей, расположенных на пластине [1], и совпадает с аналитическим решением [5]:

$$C_{ya\infty} = 2\pi \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол атаки.

Для моделирования влияния экрана используется метод отражения, схема которого изображена на рис. 1. Экран моделируется симметрично расположенной пластиной с отражёнными дискретными вихрями, которые имеют такую же интенсивность, но противоположный знак.

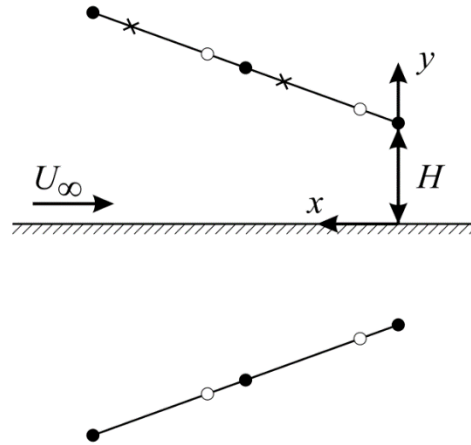


Рис. 1. Модель экрана

Коэффициенты матрицы аэродинамического влияния вычисляются по формуле:

$$A_{i,j} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{(x_{c,i} - x_{v,j}) \cos \alpha + (y_{c,i} - y_{v,j}) \sin \alpha}{(x_{c,i} - x_{v,j})^2 + (y_{c,i} - y_{v,j})^2} - \frac{(x_{c,i} - x_{v,j}) \cos \alpha + (y_{c,i} - \bar{y}_{v,j}) \sin \alpha}{(x_{c,i} - x_{v,j})^2 + (y_{c,i} - \bar{y}_{v,j})^2} \right), \quad (3)$$

где  $x_{c,i}, y_{c,i}, x_{v,i}, y_{v,i}$  – координаты  $i$ -ой контрольной точки и  $j$ -го дискретного вихря, соответственно;  $\bar{y}_{v,j}$  – ордината  $j$ -го отражённого дискретного вихря.

В случае обтекания пластины безграничным потоком отсутствует второе слагаемое формулы (3). В СЛАУ (1) вектор-столбец правых частей  $[R]$  является проекцией вектора набегающего потока на нормаль плоскости пластины. Элементы матрицы  $[R]$  определяются по формуле:

$$R_i = -V_\infty \sin \alpha.$$

Расчёты выполняются для различных значений безразмерного отстояния пластины от экрана

$$\bar{H} = \frac{H}{b},$$

где  $H$  – расстояние от задней кромки до экранирующей поверхности.

Сравнение результатов расчётов, полученных методом отражений, с данными, соответствующими моделированию экрана по МДВ, показано на рис. 2. Введено

обозначение относительной подъёмной силы  $\bar{C}_{ya} = C_{yaH} / C_{yaH=\infty}$ ;  $C_{yaH}$  и  $C_{yaH=\infty}$  – коэффициенты подъёмной силы пластины над экраном на высоте  $H$  и в безграничном потоке, соответственно.

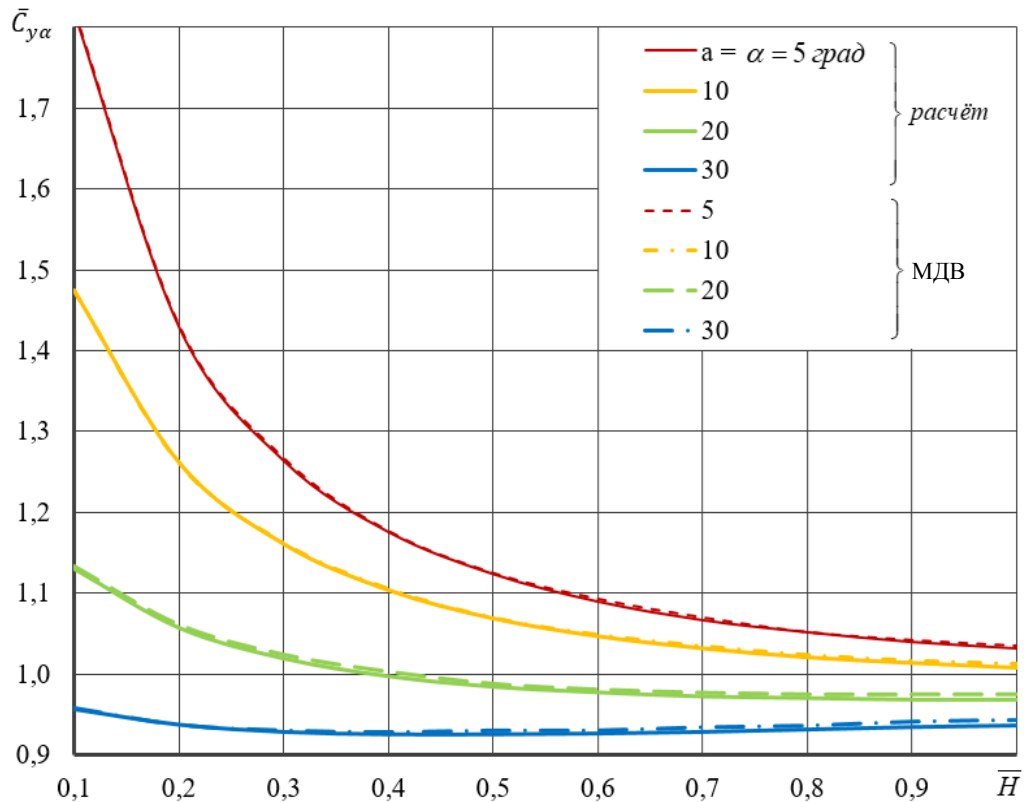


Рис. 2. Сравнение результатов расчёта относительной подъёмной силы пластины, полученных методом отражения и моделированием экрана по МДВ

Из рис. 2 видно, что с увеличением угла атаки экранный эффект постепенно пропадает, и подъёмная сила пластины даже уменьшается при приближении к экрану. Сравнение полученного результата с моделированием по МДВ для различных углов атаки показало отличие не более 1%. Отмечая хорошую согласованность полученных результатов, предпочтение в выборе из двух методов следует отдать методу отражений, поскольку матрица аэродинамического влияния в этом методе имеет меньшие размеры.

На рис. 3 представлены результаты расчёта относительного коэффициента подъёмной силы для больших значений безразмерного отстояния пластины от экрана.

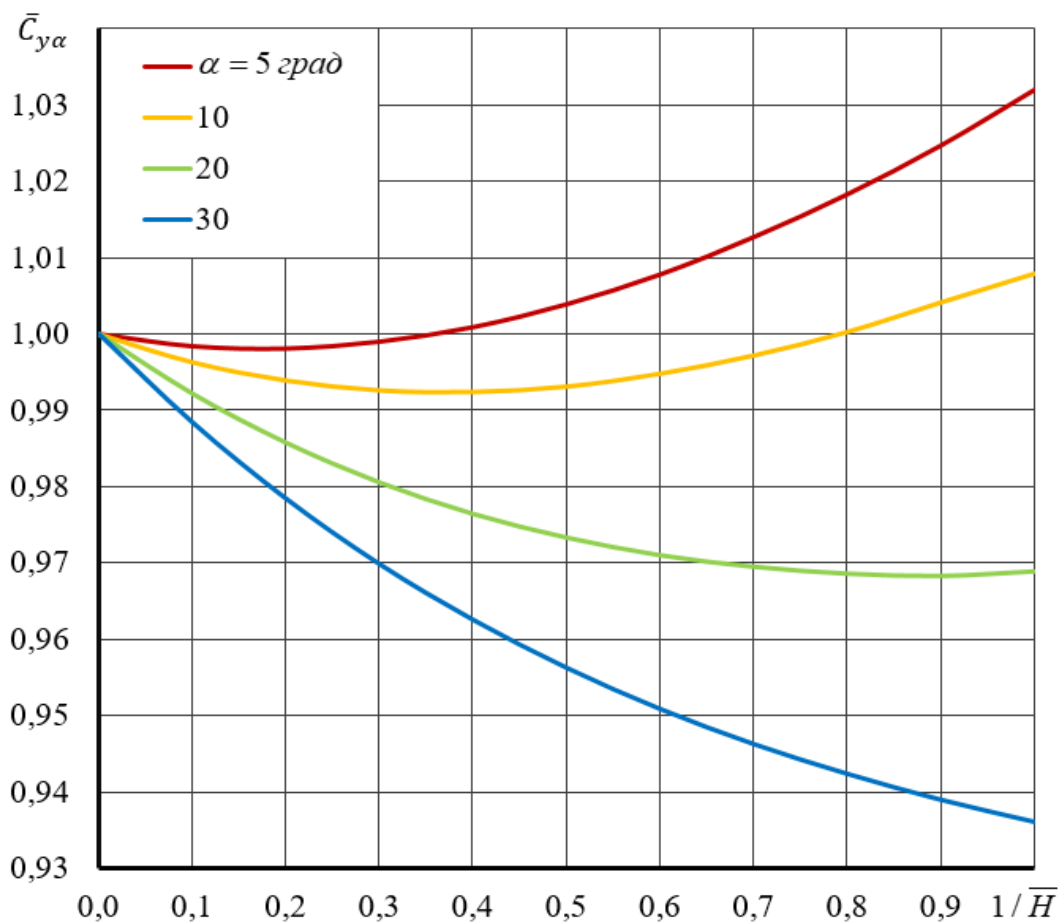


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента подъёмной силы от относительной высоты над экраном и углов атаки

По мере удаления пластины от экранирующей поверхности относительный коэффициент подъёмной силы пластины стремится к единице, независимо от угла атаки. Полученные результаты полностью согласуются с полученными в [1, 3, 4]. Таким образом, экран может оказывать как благоприятное, так и негативное воздействие на подъёмную силу пластины.

Для построения кривой, представленной на рис. 4, был применён метод последовательных приближений, заключающийся в нахождении таких углов атаки  $\alpha^{пред}$ , для которых выполняется условие:  $\bar{C}_{ya}(\alpha; \bar{H}) = 1$ . Выше и ниже этой кривой экран оказывает отрицательное и положительное воздействие на несущие свойства пластины, соответственно.

На основании полученных результатов можно констатировать, что чем меньше расстояние от экрана, тем больше диапазон углов атаки, оказывающих положительное влияние на несущую способность пластины. Полученные результаты могут быть полезны

при проектировании тонких аэродинамических профилей для летательных аппаратов, совершающих полёт вблизи земли.

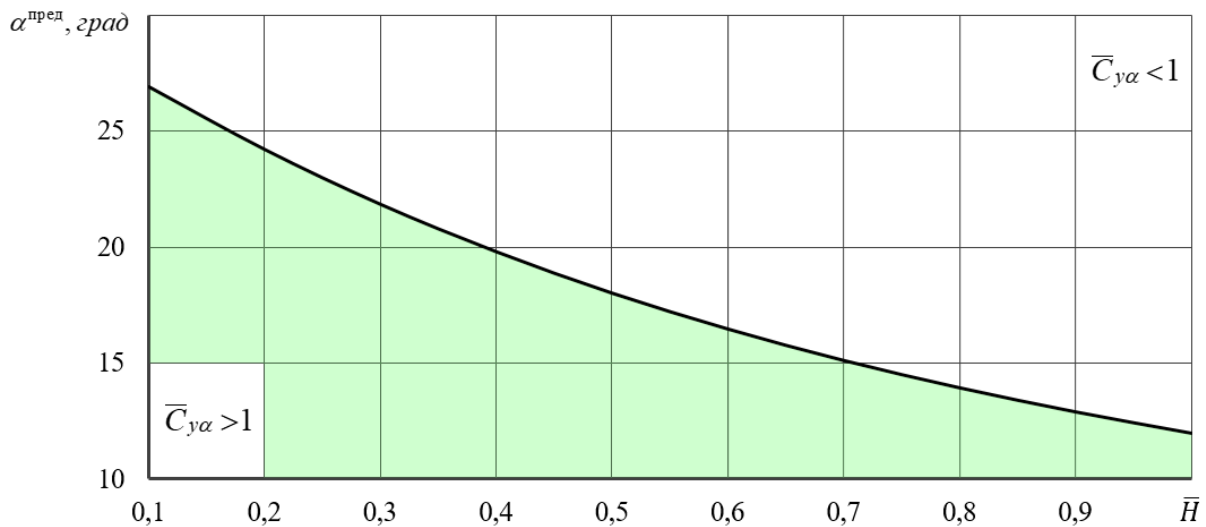


Рис. 4. Положительный и отрицательный экраный эффект

Плоская пластина является бесконечно тонким аэродинамическим профилем с нулевой кривизной, поэтому полученные расчётные значения коэффициента подъёмной силы позволяют оценить максимальное превышение несущей способности тонких аэродинамических профилей без кривизны при движении вблизи экрана.

### Библиографический список

1. Белоцерковский, С.М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1965. – 242 с.
2. Белоцерковский, С.М., Лифанов, И.К., Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 256 с.
3. Ивантеева, Л.Г., Коновалов, С.И., Павловец, Г.А. Расчёт аэродинамических характеристик профиля вблизи экрана при заданных значениях его геометрических параметров // Учёные записки ЦАГИ. – 1980. – Т. XI. – №2. – С.1-9.
4. Терентьев, А.Г., Картузова, Т.В. Численное исследование обтекания профиля вблизи экрана // Изв. национ. акад. наук и искусств Чув. рес. – 1996. – №6. – С.94-104.